مطالعهٔ تجربی مشخصه‌های شکست جت‌های آب با مقاطع بیضوی، مستطیلی و دایروی*

امین جابری[۱]		مهران تاج‌فر[۲]		آرمین شیدانی[۳]

چکیده *در این پژوهش ناپایداری جت‌های آب بیضوی، مستطیلی و دایروی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌است. از روش سایه‌نگاری برای ثبت لحظه‌ای ستون جت استفاده شد. پارامترهای جت همچون طول شکست و طول موج تغییر محور به‌صورت کمی بررسی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان داد که به‌دلیل مشخصه‌های مشترک جت‌های مستطیلی و بیضوی، طول شکست جت بیضوی با جت مستطیلی در رژیم باد القایی دوم تقریباً ایکسان ست. درمقایسه با جت دایروی، جت‌های بیضوی و مستطیلی زودتر تحت تأثیر اثرات آیرودینامیکی قرار می‌گیرند و بنابراین زودتر وارد رژیم جریان باد القایی اول می‌شوند. همچنین نشان داده شد که طول موج پدیدهٔ تغییر محور در اعداد وبر پایین به هندسهٔ جت وابسته نیست و برای جت‌های مستطیلی و بیضوی یکسان است. مشاهده شد که در اعداد وبر بالا، طول موج تغییر محور جت مستطیلی بزرگ‌تر از جت بیضوی می‌باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده رابطه‌ای نیمه‌تجربی برای تخمین طول موج تغییر محور پیشنهاد داده شد.*

واژه‌های کلیدی شکست جت آب، پدیدهٔ تغییر محور، جت بیضوی، جت مستطیلی، جریان‌های دوفازی.

Experimental Investigation of Breakup Characteristics of Elliptical, Rectangular and Circular Water Jets

A. Jaberi		M. Tadjfar		A. Sheidani

Abstract *In this study, the instabilities of elliptical, rectangular and circular water jets were experimentally investigated. Shadowgraph technique was employed to capture the jet column status instantaneously. Jet parameters such as disintegration length and axis switching wavelength were quantitatively studied. The results showed that due to the similar characteristics of rectangular and elliptical jets, their breakup length in the second wind-induced regime is nearly equal, while the breakup length of circular jet is perceptibly shorter. Both rectangular and elliptical jets are affected by aerodynamic forces sooner and thus enter the first wind induced regime at lower velocities. Furthermore, it was revealed that the axis switching wavelength is not dependent upon the jet geometry at low Weber numbers and remains equal for both elliptical and rectangular jets. However, at high Weber numbers, the axis switching wavelength of rectangular jet become larger than the elliptical one. Based on the obtained results, a semi-empirical relation was proposed to predict the axis switching wavelength of rectangular and elliptical jets.*

Key Words Water jet breakup; Axis switching phenomenon; Elliptical jet; Rectangular jet; Multiphase flows.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۳/۲۱ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.68226

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکدهٔ مهندسی هوافضا. ajaberi@aut.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکدهٔ مهندسی هوافضا.

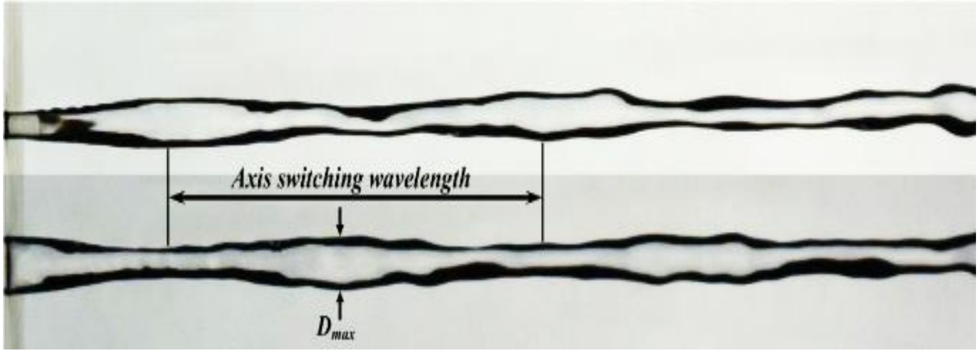
(۳) کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکدهٔ مهندسی هوافضا.

مقدمه

شکست جت مایع و پاشش آن دارای کاربردهای فراوان و متنوعی در صنایع مختلف می‌باشد. به‌عنوان مثال می‌توان به پاشش رنگ در صنایع رنگ‌آمیزی، پاشش سوخت در موتورهای احتراقی، کنترلگر ماهواره‌ها، تزریق جوهر در چاپگرها، اسپری‌های دارویی در صنایع داروسازی، انژکتورهای پاشش آب در صنایع کشاورزی، جت‌های آب برای برش قطعات صنعتی و موارد گوناگون دیگر اشاره کرد. این کاربرد گسترده باعث شده‌است که محققان زیادی به پژوهش برروی فیزیک شکست و پاشش جت مایع بپردازند و جنبه‌های گوناگون آن را مورد بررسی قرار دهند. فهم درست پدیده شکست و تعیین نحوهٔ اثرپذیری آن از پارامترهای مختلف، عامل کلیدی در طراحی سیستم‌های پاشش و بهینه‌سازی آن درجهت متناسب با کاربری آن می‌باشد. از همین‌رو پیشینهٔ تحقیق برروی نازل‌های تزریق جت مایع به بیش از ۱۷۰ سال پیش باز می‌گردد.

ساوارت [1] نشان داد که طول شکست یک جت دایروی با حاصل‌ضرب سرعت جت در قطر آن متناسب است. پلاتو [2] اولین آنالیز تحلیلی را برروی پایداری ستون جت دایروی انجام داد و نشان داد که جت مایع برای کمینه‌کردن انرژی سطحی خود تمایل به شکسته‌شدن و تبدیل‌شدن به قطره را دارد که دارای مساحت سطح کمتری نسبت به ستون جت مایع است. با نادیده‌گرفتن اثرات گاز محیط (گازی که جت به درون آن تزریق می‌شود)، اثرات ویسکوزیتهٔ جت مایع و همچنین نیروی گرانشی، ریلی [3, 4] تئوری پایداری خطی خود را ارائه کرد و نشان داد که اگر تنها نیروهای مویینگی درنظر گرفته شوند، یک جت دایروی زمانی ناپایدار می‌شود که در معرض اغتشاشات متقارن با طول موج بزرگ‌تر از محیط جت قرار بگیرد. وِبر [5] با گسترش تئوری ریلی توانست برای سرعت‌های پایین، اثرات لزجت مایع و چگالی گاز محیط را نیز درنظر بگیرد. او نتیجه گرفت که اثرات لزجت همواره باعث افزایش طول موج اغتشاشی می‌شود که به‌ازای آن شکست جت مایع آغاز می‌شود. پس از آن تیلور [6] نشان داد که چگالی گاز محیط می‌تواند اثرات قابل‌توجهی برروی شکست جت مایع داشته باشد. در تمامی مطالعات بالا تنها جت‌های دایروی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این مورد بوگی [7]، ریتز [8] و لین و ریتز [9] گزارش‌های کاملی در مورد شکت جت مایع دایروی ارائه داده‌اند. اما همان‌طور که در مقالهٔ مروری بیروک و لِکیک [10] تأکید شده‌است، هندسهٔ نازل نقشی کلیدی در مشخصه‌های شکست جت مایع بازی می‌کند.

از میان تمامی پارامترهای هندسی یک نازل، هندسهٔ نازل خروجی دارای بالاترین اهمیت است. همانند مطالعاتی که در بالا اشاره شد، در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده جت‌های دایروی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و جت‌های غیردایروی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جت‌های غیردایروی باعث افزایش ناپایداری جت مایع می‌شوند و فرایند شکست را تسریع می‌بخشند. از دیدگاه احتراقی، جت‌های غیردایروی می‌توانند باعث افزایش اختلاط سوخت، بهبود عملکرد احتراق و کاهش ناپایداری‌های احتراق شوند [11]. بنابراین می‌توان نازل‌های غیردایروی را به‌عنوان عملگرهای غیرفعال در کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار داد [12]. از طرفی در برخی از هندسه‌های غیردایروی همچون بیضوی و مستطیلی پدیدهٔ تغییر محور رخ می‌دهد که بررسی فیزیک آن بسیار مورد توجه است. وقتی جت مایع از یک نازل کشیده همچون مستطیلی یا بیضوی خارج می‌شود، نیروی سطحی می‌خواهد که با کم‌کردن مساحت سطح و رسیدن به شکلی دایروی به حداقل انرژی ممکن برسد، درطی این تغییر یک سرعت عرضی ایجاد می‌شود که تمایل به ادامهٔ حرکت دارد و بنابراین تغییر شکل ادامه پیدا می‌کند و با رسیدن دو موج سرعت از طرفین و برخورد با یکدیگر، این بار درجهت مخالف قطر جت رشد می‌کند. درواقع در این پدیده، با حرکت جت به‌سمت پایین، محورهای بزرگ و کوچک جت جابه‌جا می‌شود. در شکل (۱) این پدیده برای یک نازل مستطیلی و در عدد وبر ۳۲۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۱ پدیدهٔ تغییر محور در جت‌های بیضوی و مستطیلی

مگـنس [13] بـرای اولـین‌بـار بـه بررسـی جـت خروجی از نازل‌های غیردایروی پرداخت و پدیدهٔ تغییر محور را مورد بررسی قرار داد. او هندسه‌های مختلفـی همچون مستطیلی، بیضوی، سه‌گوش، صلیبی و غیره را مورد بررسی قرار داد. با این‌همه در مطالعـات صـورت گرفته برروی هندسـه‌هـای غیردایـروی، تمرکـز اصـلی برروی نازل‌های بیضوی بوده‌است. کاسیاپ و همکاران [14] به بررسی تجربی نازل‌های بیضوی پرداختنـد. در این پژوهش ٦ نازل بیضوی با ضرایب منظری مختلـف بـه‌همـراه ۲ اریفـیس دایـروی بـه‌عنـوان نـازل مرجـع، آزمایش شدند. در ادامهٔ همین کار، کاسیاپ و همکاران [15] بااستفاده از همین نازل‌ها و تنهـا بـا اضـافه‌کـردن مخلوط یک‌به‌یک آب-گلیسیرول به‌عنوان مایع جت در کنـار آب، بـه بررسـی اثـرات تـنش سـطحی بـرروی مشخصه‌های نازل‌های بیضوی پرداختند. همچنین امینی و دولت‌آبادی [16] به بررسی تحلیلی و تجربی اثـرات اغتشاش برروی جت‌های بیضـوی پرداختنـد. شـارما و فانگ [17] بـه بررسـی تجربـی شکسـت جـت آب از چهار نـازل دایـروی، مسـتطیلی، مربعـی و سـه‌گـوش پرداختند. در این مقاله اثر فشـارهای بسـیار بـالا مـورد بررسی قرار گرفته‌است. وانـگ و فانـگ [12] در ادامـهٔ کار قبلی و بااستفاده از همان نازل‌ها، به‌صورت دقیق‌تـر به بحث در مورد پدیدهٔ تغییر موج پرداخته‌انـد و نشـان داده‌اند که برای نازل‌های مربعی و سه‌گوش این پدیـده رخ نمی‌دهد.

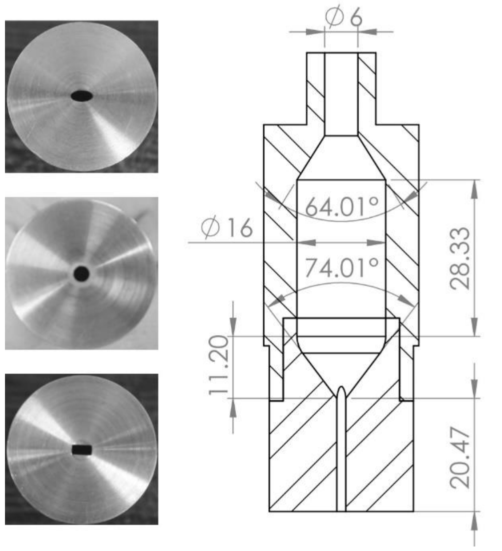
بررسی پژوهش‌هـای پیشـین نشـان مـی‌دهـد کـه مطالعـهٔ جـامعی در ایـن زمینـه انجـام نشـده اسـت. کونکاچـابو و همکـاران [18] بـه بررسـی شـیارهای مستطیلی بـرای اسـتفاده در رآکتورهـای هسـته‌ای مـی پردازد و از فلز مذاب مایع به‌عنوان مایع استفاده می‌کنـد. در کاری دیگر، نِگید و همکاران [19] بـه بررسـی تجربـی صفحه مایع تشـکیل‌شـده از چهـار شـیار مسـتطیلی بـا گوشه‌هایی دایروی پرداخته‌است.

با درنظر گرفتن پیشینهٔ مطالعات صورت‌گرفته، می توان نتیجه گرفت کـه هنـوز پژوهشـی جـامع درمـورد تزریـق جـت مـایع از نـازل‌هـای مسـتطیلی صـورت نگرفته‌اسـت و رفتـار شکسـت آن و خصوصـاً پدیـدهٔ شکست در آن مورد بررسی قرار نگرفته‌است. ازطرفـی باتوجـه بـه رفتارهـای مشـابه جـت‌هـای بیضـوی و مستطیلی، مقایسهٔ دقیـق و جـامع بـین ایـن دو هندسـه ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مقاله بااستفاده از جـت های بیضوی، مسـتطیلی و دایـروی (بـه‌عنـوان هندسـهٔ مرجع) و بااستفاده از آب به‌عنـوان مـایع جـت، تزریـق جت‌های مایع با هندسـه‌هـای غیردایـروی در اتمسـفر ساکن مـورد بررسـی قـرار گرفتـه‌اسـت و پارامترهـای مختلف جریان یعنی طول شکسـت جـت، طـول مـوج تغییر محور و دامنهٔ آن مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

تجهیزات تجربی

سه انژکتور با هندسه‌های بیضوی، مستطیلی و دایـروی،

از جنس استیل و بااستفاده از ماشین‌کاری برش سیم ساخته شده‌است. نقشهٔ ساخت انژکتورها به‌همراه تصویر سه هندسهٔ آزمایش‌شده در شکل (۲) آمده‌است. به‌منظور میرا کردن ناپایداری‌های احتمالی جریان، محفظهٔ آرامشی به‌طول و قطر 28.33 و 16 میلی‌متر قبل از ورود جریان به انژکتور تعبیه شده‌است. دقت لازم برای جلوگیری از ایجاد پله در نقطهٔ اتصال این دو بخش به‌کار گرفته شد. مخروطی با نیم‌زاویهٔ ۳۷ درجه جریان مایع را به جت خروجی می‌رساند. نسبت منظری انژکتورهای بیضوی و مستطیلی (نسبت طول بزرگ به طول کوچک) برابر ۲ و مساحت هر سه انژکتور $6.283mm^2$ می‌باشد.



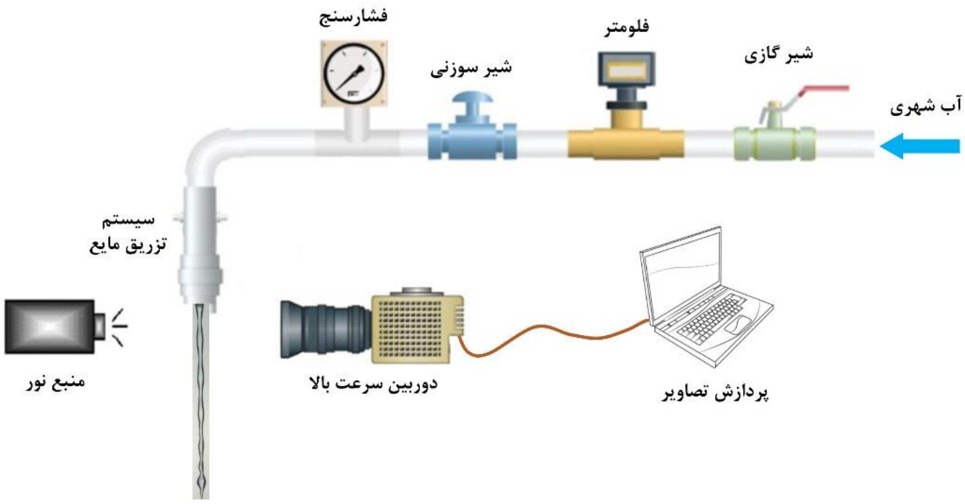
شکل ۲ نقشهٔ ساخت انژکتورها به‌همراه محفظهٔ آرامش جریان

در این پژوهش از آب لوله‌کشی شهر به‌عنوان مایع تزریقی استفاده شده‌است. در سرعت‌های پایین، دبی جریان با اندازه‌گیری میزان آب تخلیه‌شده در یک زمان ثابت و در سرعت‌های بالا از یک روتامتر استفاده شده‌است. دبی جریان توسط یک شیر سوزنی قابل‌کنترل است. در شکل (۳) نمای کلی سیستم تزریق آب نمایش داده شده‌است. برای بررسی تغییرات پارامترهای مختلف جت مایع، سرعت جریان آب از 0.24 متر بر ثانیه تا 4.6 متر بر ثانیه تغییر کرده‌است. با محاسبهٔ عدد وبر از رابطهٔ (۱)، گسترهٔ بررسی عدد وبر بین 2.17 تا 792 می‌باشد.

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \qquad (۱)$$

که در این رابطه ρ چگالی مایع، V سرعت جریان مایع، D قطر معادل انژکتور و σ ضریب تنش سطحی مایع می‌باشد که برای آب 0.0728 نیوتون بر متر است.

برای گرفتن تصاویر با کیفیت بالا و در مدت زمان خیلی کوتاه به‌گونه‌ای که قادر به ثبت پدیده‌های با فرکانس بالا باشد، از یک دوربین سرعت بالای Nikon 1 J4، مجهز به لنز نیکور 30-10 میلی‌متری بهره گرفته شده‌است. این دوربین قادر به عکس‌برداری در مدت زمان 62.5 میکروثانیه می‌باشد. این زمان به‌اندازهٔ کافی کوچک است که بتوان پدیده‌های مختلف جریان را مشاهده کرد. چنان‌که به‌صورت طرح‌واره در شکل (۳) آمده‌است، یک منبع نوری در پشت جریان جت قرار گرفته که به‌واسطهٔ آن، سایهٔ تشکیل‌شده از جت توسط دوربین ثبت می‌شود. برای اندازه‌گیری ابعاد پیکسل یک عکس، از یک نشانگر با قطر مشخص استفاده شده‌است. یک برنامهٔ پردازش تصویر برای تحلیل عکس‌ها نوشته شده‌است که با پیداکردن نشانگر و شمارش تعداد پیکسل‌های آن، اندازهٔ دقیق هر پیکسل را محاسبه می‌کند. همچنین این برنامه قادر به اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر جت ازجمله طول شکست، قطر جت و طول موج تغییر محور می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده در هر شرایط آزمایشی از میانگین ۵۰ عکس به‌دست آمده‌است.



شکل ۳ طرح‌وارهٔ سیستم آزمایشگاهی

نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده در سه بخش ارائه می‌شود. ابتدا تصاویر به‌دست‌آمده از جت‌های مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد و سپس در بخش بعد طول شکست هر جت بررسی می‌شود. در بخش نهایی، پدیدهٔ تغییر محور که در جت‌های بیضوی و مستطیلی رخ می‌دهد به‌طورکامل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

آشکارسازی تصاویر تزریق جت در شرایط مختلف

برای مطالعهٔ بیشتر و امکان مقایسهٔ رفتار شکست جت های بیضوی و مستطیلی، از یک جت دایروی به‌عنوان مرجع استفاده شده که رفتار کلی آن در مجموعهٔ تصاویر شکل (٤) که در آن عدد وبر جت تزریقی تغییر می‌کند، آورده شده‌است. در این شکل، عدد زیر هر تصویر بیانگر عدد وبر مربوط به آن است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در سرعت‌های پایین سطح جت کاملاً صاف و آرام است که هیچ آشفتگی برروی آن دیده نمی‌شود. از مشاهدهٔ تصاویر می‌توان تخمین زد که تا عدد وبر 10.3 رژیم جریان کاملاً آرام است و امواج تشکیل‌شده برروی جت که منجر به شکست ستون مایع می‌شوند کاملاً متقارن می‌باشند. نوع شکست در این بازه از نوع شکست ریلی است که در این رژیم نیروهای سطحی کاملاً غالب هستند و اثرات آیرودینامیکی هوای اطراف کاملاً ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

طول شکست ستون مایع تا عدد وبر 10.3 افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش ناگهانی پیدا می‌کند. این کاهش ناگهانی به‌دلیل تقویت‌شدن اثرات گاز اطراف و شروع رژیم شکست باد القایی اول (First wind induced) است. درواقع با افزایش تدریجی سرعت جت تزریقی، آرامی سطح جت دستخوش تغییرات می‌شود و ناپایداری‌هایی با دامنه‌های خیلی کوچک برروی آن شکل می‌گیرد که با بیشتر شدن سرعت جت، رشد می‌کنند و بر جریان اصلی غالب می‌شوند. در عدد وبر 42.1 طول شکست جت دایروی به مقدار کمینهٔ خود می‌رسد. تا این عدد وبر می‌توان گفت که امواج تشکیل‌شده برروی جت هنوز شکل متقارن خود را حفظ کرده‌اند.



شکل ٤ تزریق جت آب دایروی در اعداد وبر مختلف

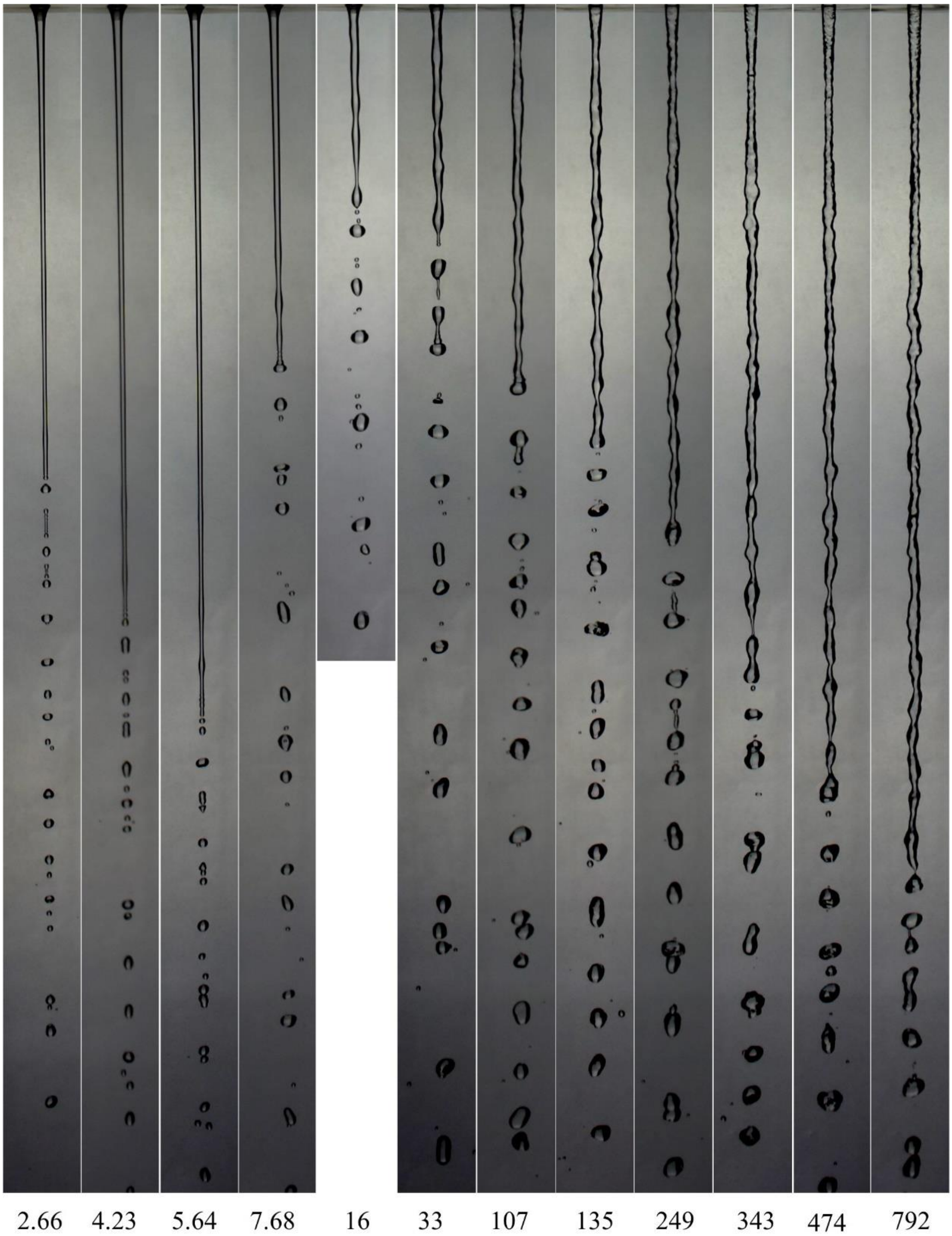
با گذر افزایش عدد وبر جت از 42.1، طول شکست ستون مایع به‌تدریج افزایش پیدا می‌کند. درواقع با آغاز شدن رژیم جریان باد القایی دوم (Second wind induced)، اثرات آیرودینامیکی گاز اطراف غالب می‌شود و طول شکست ستون مایع را کنترل می‌کند. در این رژیم ناپایداری‌های رشدیافته

برروی سطح جت منجر به شکست ستون جت می‌شود و اثر نیروهای سطحی دیگر قابل‌ملاحظه نیست. تصاویر شکل (٤) همچنین نشان می‌دهد که در سرعت بالا جداشدن تکه‌ای (Ligament) از روی ستون مایع مشاهده می‌شود. همچنین قطرات تشکیل‌شده در این رژیم به‌صورت محسوسی بزرگ‌تر از قطرات شکل‌گرفته در سرعت‌های پایین هستند. به‌منظور مشاهدهٔ رفتار جت در سرعت‌های بالا، جت آب در عدد وبر 1935 تزریق شد. می‌توان مشاهده کرد که در این سرعت امواج عرضی برروی ستون جت تشکیل شده‌اند که منجر به جداشدن تکه‌ای مایع از روی سطح جت قبل از شکست آن شده‌است. این پدیده‌ها برروی شکل با کادر زردرنگ مشخص شده‌اند. همچنین در این عدد وبر تکهٔ جداشده از ستون جت پس از شکست بسیار بزرگ‌تر از تکه‌های ایجادشده در سرعت‌های پایین‌تر است.

شکل (٥) جت خروجی از نازل بیضوی را در اعداد وبر مختلف نمایش می‌دهد. در تمامی این تصاویر عکس‌برداری نسبت به محور بزرگ جت بیضوی بوده‌است. ابعاد جت‌های این تصاویر مطابق شکل، در اعداد وبر پایین کمتر از 5.64، جت بیضوی کاملاً تحت تأثیر نیروی سطحی قرار دارد و در فاصلهٔ کوتاهی پس از خروج از نازل، شکل دایروی به خود می‌گیرد و اثرات هندسهٔ اولیهٔ جت سریعاً میرا می‌شود. تا این عدد وبر، جریان در رژیم ریلی قرار دارد و طول شکست به‌صورت خطی به سرعت افزایش پیدا می‌کند تا این‌که در عدد وبر 5.64 به‌مقدار بیشینهٔ خود می‌رسد. چنان‌که در شکل‌ها دیده می‌شود، ناپایداری‌های تشکیل‌شده در نزدیکی نقطهٔ شکست ستون جت کاملاً متقارن هستند.

با افزایش سرعت جریان جت، اثرات آیرودینامیکی هوای اطراف به‌تدریج مهم می‌شود و با واردشدن جریان به رژیم اول باد القایی، طول شکست آن کاهش پیدا می‌کند و در عدد وبر 16 به‌مقدار کمینهٔ خود می‌رسد. در عدد وبر 7.68 برای اولین‌بار پدیدهٔ تغییر محور قابل‌مشاهده است، اگرچه دامنه و طول موج آن به‌قدری کوچک است که به‌سختی قابل‌مشاهده است. با افزایش عدد وبر و بیشترشدن نیروی اینرسی جریان که عامل اصلی رخ‌دادن پدیدهٔ تغییر محور است، شناسایی آن برروی ستون جت به‌راحتی ممکن است. همچنین، همانند جت دایروی، اندازهٔ قطرات جداشده از جت نیز به‌صورت محسوسی بزرگ‌تر از قطرات جداشده در رژیم ریلی می‌باشد. پس از عدد وبر 16 با افزایش سرعت، طول موج پدیدهٔ تغییر محور و همچنین طول شکست جت افزایش پیدا می‌کند. باتوجه به این‌که پدیدهٔ تغییر محور بالانسی بین نیروهای اینرسی و سطحی است، با افزایش سرعت جت، طول موج تغییر محور نیز افزایش پیدا می‌کند. درعین‌حال با افزایش عدد وبر، تعداد دفعات تغییر محور در طول حرکت جت به‌سمت پایین کاسته می شود چرا که به‌دلیل رشد ناپایداری‌ها و شکست جت، فرصت کافی برای تغییر محور بیشتر در امتداد جت وجود ندارد.

با افزایش بیشتر عدد وبر و قوی‌ترشدن اثرات هوا، سطح جت رفتار نوسانی پیدا می‌کند و اغتشاش‌های نامتقارنی برروی آن شکل می‌گیرد. این ناآرامی‌ها عامل اصلی شکست جت در این رژیم هستند. چنان‌که مشاهده می‌شود در اعداد وبر بالا، پدیدهٔ تغییر محور تنها دو تا سه بار رخ می‌دهد و پس از آن هندسهٔ جریان به‌قدری به‌هم می‌ریزد که دیگر تشخیص هندسهٔ جریان میسر نیست. در عدد وبر 792 پس از دومین تغییر محور، جریان کاملاً به‌هم می‌ریزد و شکل بیضوی خود را به‌طور کامل از دست می‌دهد. در این سرعت جت کاملاً در رژیم القایی باد دوم قرار می‌گیرد و شکست عمدتاً به‌خاطر موج‌هایی با طول پایین و فرکانس بالا است که برروی سطح جت رشد کرده‌اند. باید اشاره شود که مشابه جت دایروی، جداشدن تکه‌ای در جت‌های بیضوی نیز مشاهده شده‌است، اگرچه این پدیده در شکل (٥) نمایش داده نشده‌است.



شکل ۵ تغییرات رفتار شکست جت بیضوی در اعداد وبر مختلف

در شکل (٦) تصاویر جت تزریقی از نازل مستطیلی در اعداد وبر مختلف نمایش داده شده‌است. یکسان نبودن طول تصاویر در این شکل به‌منظور هم‌مقیاس کردن ابعاد جت در بین همهٔ تصویرها انجام شده‌است. در اعداد وبر پایین، وقتی‌که جریان کاملاً آرام است، هندسهٔ مستطیلی جت خیلی سریع توسط

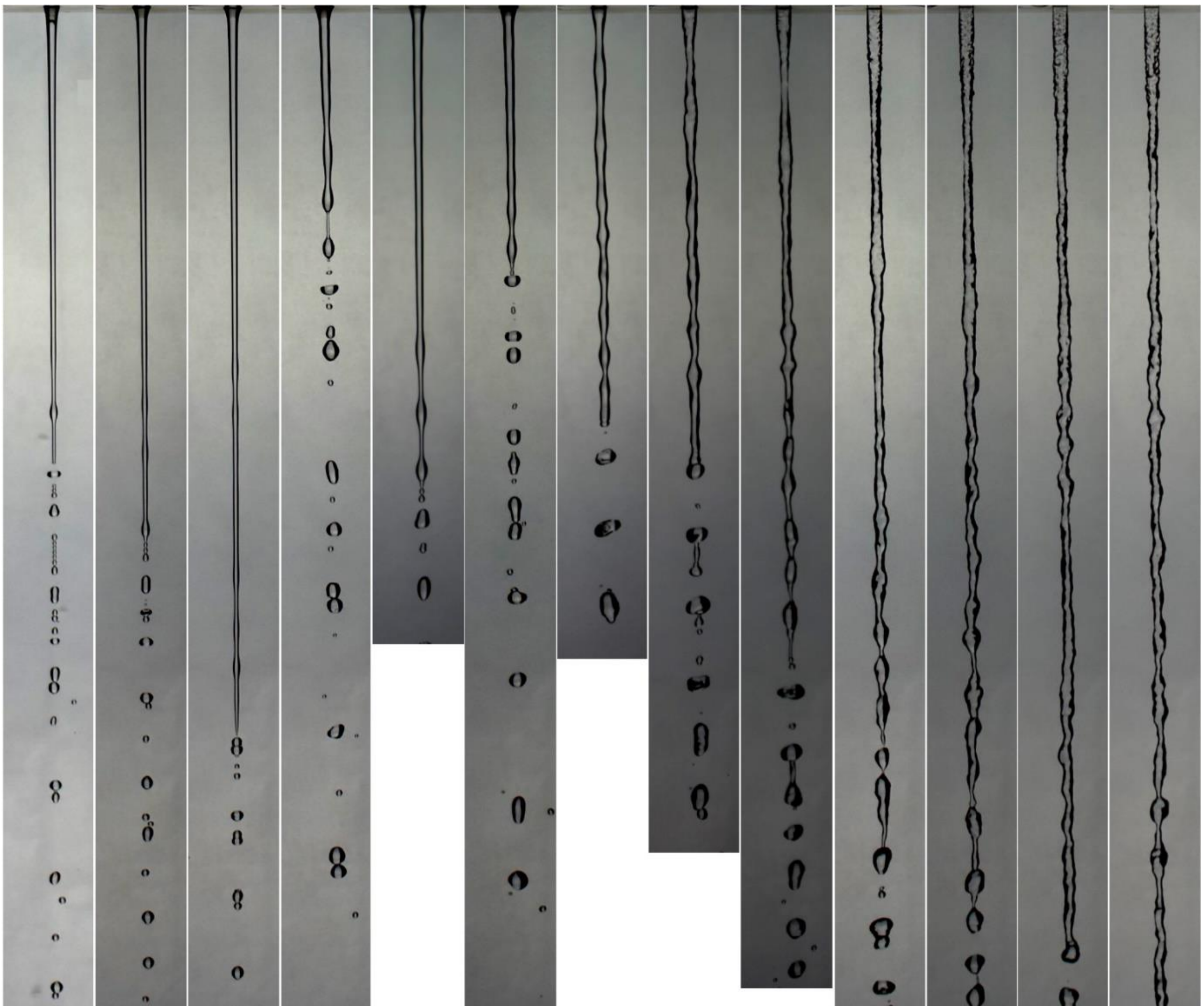
نیروی سطحی از بین می‌رود و در دو مرحله از مستطیلی به شبه‌بیضوی و سپس به‌شکل دایروی تغییر پیدا می‌کند. در این رژیم سرعت، سطح جت کاملاً صاف و آرام است و شکست ستون جت تحت تأثیر نیروی سطحی رخ می‌دهد. تا عدد وبر 4.83 جت در رژیم ریلی قرار دارد و طول شکست آن با افزایش سرعت زیاد می‌شود. درمقایسه با جت بیضوی می‌توان گفت که به‌دلیل ناپایداری بیشتر جت‌های مستطیلی که به‌خاطر گوشه‌های زاویه‌دار آن وارد جریان می‌شود، طول شکست کمتر و رژیم ریلی زودتر پایان می‌یابد، به‌گونه‌ای که در عدد وبر 4.83، طول شکست به مقدار بیشینه خود می‌رسد. درمقایسه با جت بیضوی، جت مستطیلی در سرعت پایین‌تری به‌مقدار کمینهٔ طول شکست خود می‌رسد. کمینهٔ طول شکست در جت بیضوی در عدد وبر 16 حاصل می‌شود، درحالی‌که برای جت مستطیلی در عدد وبر 6.69 به طول شکست کمینهٔ خود می‌رسد. در همین عدد وبر پدیدهٔ تغییر محور برروی سطح جت قابل مشاهده است که به‌نظر می‌رسد با اختلاف کمی، زودتر از جت بیضوی پدیدهٔ تغییر محور رخ داده‌است.

از تفاوت‌های اصلی جت مستطیلی با جت بیضوی افزایش ناگهانی طول شکست و کاهش دوبارهٔ آن است به‌گونه‌ای که یک نقطهٔ بیشینهٔ ثانویه برای طول شکست در عدد وبر 9.07 اتفاق می‌افتد. این افزایش ناگهانی طول شکست در کار وانگ و فانگ [12] نیز برای جت‌های مربعی و سه‌گوش گزارش شده‌است. چنان‌که از شکل دیده می‌شود طول شکست ثانویه از طول شکست اولیه کوتاه‌تر است. با افزایش بیشتر عدد وبر، طول شکست دوباره کاهش پیدا می‌کند که پس از آن افزایش بیشتر عدد وبر، به‌صورت پیوسته طول شکست را نیز افزایش می‌دهد. در عدد وبر 32 پدیدهٔ تغییر محور به‌خوبی قابل‌مشاهده است. در این عدد وبر، سطح جت به‌میزان قابل‌توجهی در بالادست جریان و نواحی نزدیک به صفحهٔ خروجی جت صاف و آرام است، اما با پیشروی درجهت جریان که با رشد ناپایداری‌ها همراه است، سطح جت دستخوش تغییر می‌شود و اعوجاج‌هایی برروی آن شکل می‌گیرد.

با افزایش بیشتر سرعت جت، اثرات آیرودینامیکی گاز تشدید می‌یابد و بر نیروی سطحی غلبه می‌کند، به‌طوری‌که ناآرامی‌ها و نوسان‌های ریز برروی سطح جت شکل می‌گیرد. در این رژیم جریان، موج‌های شکل‌گرفته برروی سطح جت وضعیت متقارن خود را از دست می‌دهند و به‌صورت نامتقارن ظاهر می‌شوند. چنان‌که در شکل نمایش داده شده‌است، طول شکست ستون جت با افزایش عدد وبر افزایش پیدا می‌کند و همانند جت‌های بیضوی و دایروی قطر قطرات تشکیل‌شده به‌طور محسوسی بیشتر می‌شود. همچنین برخلاف سرعت‌های پایین، قطرات ماهواره‌ای کمتری مشاهده می‌شود. جداشدن تکه‌ای جت مایع از ستون جت اصلی نیز در اعداد وبر بالا قابل رؤیت است. همانند طول شکست، طول موج تغییر محور نیز با افزایش سرعت جت افزایش پیدا می‌کند. طولانی‌تر شدن طول شکست به‌همراه افزایش ناپایداری‌های جریان در سرعت‌های بالا، باعث می‌شود که تعداد دفعات وقوع تغییر محور کاهش چشم‌گیری پیدا کند به‌طوری‌که در اعداد وبر بالا تنها 2 یا 3 بار تغییر محور رخ می‌دهد. درحقیقت در اعداد وبر بالای 404، هندسهٔ ستون جت تحت تأثیر اثرات هوا به‌طور کامل به‌هم می‌ریزد و دیگر امکان تعیین یک هندسهٔ مشخص برای ستون جت وجود ندارد. در این سرعت‌ها، موج‌هایی با طول موج کوتاه و فرکانس بالا برروی ستون جت شکل می‌گیرند که عامل اصلی شکست جت می‌باشند. در این رژیم، دیگر اثرات نیروی سطحی قابل اهمیت نیستند.

از نکات قابل توجه جت مستطیلی، تغییرشکل آن از هندسهٔ مستطیلی به شبه‌بیضوی است. در سرعت‌های پایین، به‌واسطهٔ نیروی سطحی قوی، گوشه‌های ۹۰ درجهٔ جت مستطیلی سریعاً پخ می‌شود و شکل دایروی

به خود می‌گیرد. با مقایسهٔ تصاویر ستون جت در سرعت‌های بالا که دارای نیروی اینرسی بیشتر است، هندسهٔ مستطیلی جت بیشتر در جریان ادامه پیدا می‌کند و با فاصلهٔ بیشتری از صفحهٔ خروجی گوشه‌های آن پخ می‌شود.



شکل ٦ رفتار شکست جت مستطیلی در اعداد وبر مختلف

طول شکست و دسته‌بندی رژیم جریان

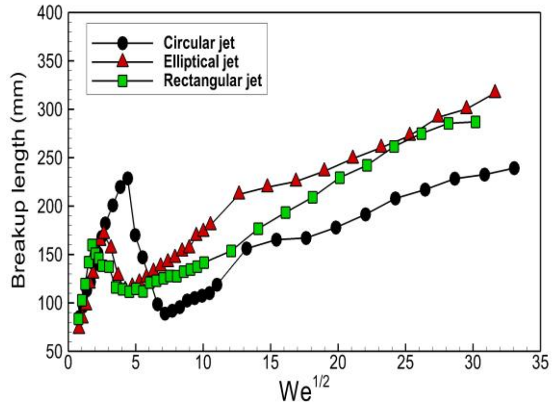
اندازه‌گیری طول شکست میانگین برای ستون جت آب تزریقی از انژکتورهای دایروی، بیضوی و مستطیلی و برای شرایط جریان متفاوت انجام شد. اولین نقطه‌ای که جت آب از ستون اصلی جدا می‌شود، به‌صورت قطره یا تکه‌ای، به‌عنوان طول شکست درنظر گرفته شده‌است. مقادیر گزارش‌شده درواقع میانگین ۵۰ عکس مختلف است و بیشینه خطای اندازه‌گیری طول 4درصد بوده‌است. باید توجه شود که شکست کمتر از طول شکست لحظه‌ای به‌دلیل ناپایداری‌ها حول این مقدار میانگین نوسان می‌کند. به‌همین‌دلیل است که طول شکست در تصاویر نمایش داده‌شده در شکل‌های (٤، ٥ یا ٦) ممکن است با مقادیر میانگین گزارش‌شده اختلاف داشته باشد. مقادیر طول شکست میانگین جت برای مجذور عدد وبر بین ۲ تا ۳۰ در شکل (۷) گزارش شده‌است. برای بررسی بهتر تغییرات طول شکست میانگین در اعداد وبر خیلی پایین، تغییرات آن در بازهٔ کوتاه‌تری از اعداد وبر در شکل (۸) آمده‌است.

مطابق شکل (۷)، رفتار کلی طول شکست برای هر سه جت تقریباً یکسان است به‌گونه‌ای که برای هر سه جت طول شکست در ابتدا به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند، به یک نقطهٔ بیشینه می‌رسد، سپس کاهش پیدا می‌کند تا به کمینهٔ خود برسد و پس از آن دوباره روند افزایشی پیدا می‌کند. این روند افزایشی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که جت وارد رژیم‌های باد القایی دوم و اتمیزاسیون شود که در آن معیار مناسبی برای تعیین طول شکست ستون جت وجود ندارد. در هر صورت بالاترین سرعت تست‌شده در این پژوهش نیز محدود به رژیم باد القایی دوم است. از کمترین سرعتی که به‌ازای آن ستون جت تشکیل می‌شود (در سرعت‌های پایین‌تر مایع به‌صورت قطره‌ای چکیده می‌شود) تا بیشینهٔ محلی طول شکست، جت در رژیم ریلی قرار دارد و چنان‌که گفته شد افزایش طول شکست رفتاری خطی دارد که برای هر سه جت این رفتار مشاهده می‌شود. از طول شکست بیشینه تا طول شکست کمینهٔ پیرو آن، جریان در رژیم باد القایی اول قرار دارد که در این رژیم به‌خاطر تشدید اثرات آیرودینامیکی هوا، طول شکست کاهش پیدا می‌کند. در هر دو رژیم ریلی و باد القایی اول، وجود ناپایداری‌های با طول موج بلند و فرکانس پایین عامل اصلی شکست ستون جت است.

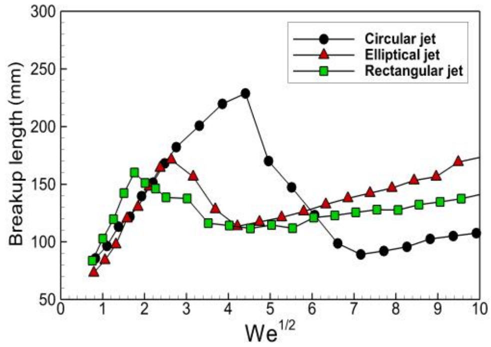
با گذر از نقطهٔ کمینهٔ طول شکست و آغاز روند افزایش طول شکست با سرعت جریان، رژیم باد القایی دوم آغاز شده‌است. در این رژیم ناپایداری‌های با طول موج کوتاه و فرکانس بالا دلیل اصلی شکست ستون جت می‌باشند و نیروی اینرسی جت قوی‌تر از نیروی سطحی آن می‌باشد. چنان‌که در شکل (۷) نمایش داده شده‌است، در این رژیم طول شکست جت دایروی با فاصلهٔ محسوسی کوتاه‌تر از جت‌های بیضوی و مستطیلی می‌باشد. نقطهٔ قابل‌توجه این است که طول شکست جت‌های مستطیلی و بیضوی در این رژیم جریان به‌هم نزدیک هستند و تفاوت کمی مشاهده می‌شود که باتوجه به مشابه‌بودن فیزیک کلی جت‌های بیضوی و مستطیلی، این نتیجه دور از انتظار نیست. بالاتر بودن طول شکست جت‌های مستطیلی و بیضوی از جت دایروی در رژیم جریان باد القایی دوم به‌دلیل حضور پدیدهٔ تغییر محور است. این پدیده که در جت دایروی روی نمی‌دهد، در رژیم باد القایی دوم نقش پایدارکننده دارد و باعث می‌شود که طول شکست جت افزایش پیدا کند. نزدیک‌بودن رفتار شکست جت‌های بیضوی و مستطیلی نشان از نقش عمدهٔ این پدیده در کنترل پایداری جریان جت‌ها دارد.

رفتار طول شکست میانگین جت‌های دایروی، بیضوی و مستطیلی برای سرعت‌های پایین در شکل (۸) بررسی شده‌است. چنان‌که اشاره شد، در رژیم ریلی طول شکست برای هر سه جت به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۸)، در این رژیم طول

شکست جت مستطیلی از جت‌های دایروی و بیضوی بیشتر می‌باشد و زودتر از دو جت دایروی و بیضوی به نقطهٔ بیشینه که پس از آن رژیم باد القایی اول آغاز می‌شود، می‌رسد. طولانی‌تر بودن رژیم ریلی برای جت‌های دایروی توسط کاسیاپ و همکاران [15] نیز گزارش شده‌است. درواقع باتوجه به این‌که جت‌های بیضوی و مستطیلی دارای محیط بیشتری نسبت به جت دایروی هستند، در نتیجه سطح تماس آنها با هوای اطراف بیشتر می‌شود و زودتر تحت تأثیر اثرات آیرودینامیکی قرار می‌گیرند. به‌همین‌دلیل است که این دو جت زودتر از جت دایروی وارد رژیم جریان باد القایی اول می‌شوند. از نکات قابل‌توجه، رفتار شکست جت مستطیلی است که برخلاف جت‌های دیگر، در نمودار آن یک نقطهٔ بیشینهٔ ثانویه دیده می‌شود. این بیشینهٔ ثانویه که توسط وانگ و فانگ [12] برای جت‌های مربعی و سه‌گوش نیز مشاهده شده‌است. همچنین باید اشاره کرد که طول شکست جت مستطیلی در سرعت‌های خیلی پایین که پدیدهٔ تغییر محور رخ نمی‌دهد، اندکی بیشتر از جت‌های دیگر است. دلیل این امر می‌تواند گوشه‌های تیز جت مستطیلی باشد که پس از طی فاصلهٔ کوتاهی توسط کشش سطحی گرد می‌شوند.



شکل۷ نمودار شکست ستون جت‌های بیضوی، دایروی و مستطیلی



شکل۸ نمودار طول شکست جت‌های بیضوی، مستطیلی و دایروی در اعداد وبر پایین

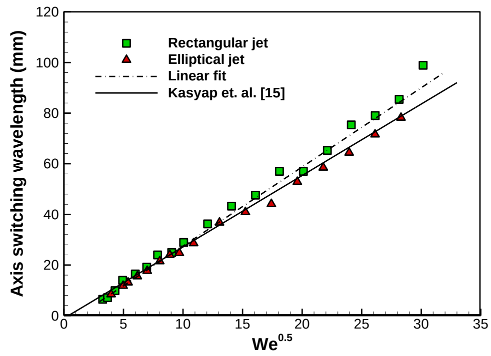
پدیدهٔ تغییر محور

مشخصات پدیدهٔ تغییر محور برای جت‌های بیضوی و مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه طول موج پدیدهٔ تغییر محور و دامنهٔ آن محاسبه شده‌است. در اعداد وبر پایین به‌دلیل قوی‌تر بودن نیروی سطحی و میرا شدن سریع هندسهٔ اولیهٔ جت، پدیدهٔ تغییر محور رخ نمی‌دهد. اما با افزایش سرعت جریان و مقابلهٔ نیروی اینرسی با نیروی سطحی، پدیدهٔ تغییر محور به‌تدریج و با دامنه و طول موج کوتاه شکل می‌گیرد. روند تشکیل پدیدهٔ تغییر محور به‌خوبی در شکل‌های (۵ و ٦) قابل‌مشاهده است. مطابق شکل (۱)، فاصلهٔ دو نقطهٔ بیشینه یا کمینهٔ ستون به‌عنوان طول موج تغییر محور درنظر گرفته می‌شود. باتوجه به این‌که در این پژوهش عکس‌برداری از زاویهٔ مقابل محور بزرگ جت‌های مستطیلی و بیضوی انجام شده‌است، فاصلهٔ دو نقطهٔ کمینهٔ ستون جت به‌عنوان طول موج تغییر محور درنظر گرفته شده‌است.

نتایج به‌دست‌آمده برای هر دو جت در شکل (۹) آمده‌است. چنان‌که دیده می‌شود، عدد وبر بحرانی که به‌ازای آن پدیدهٔ تغییر محور آغاز می‌شود تقریباً برای هر دو جت یکسان است و تفاوت بسیار ناچیزی بین جت‌های بیضوی و مستطیلی وجود دارد. از طرفی، چنان‌که در مراجع مختلف گزارش شده‌است، تغییر طول موج تغییر محور با عدد وبر رفتاری نسبتاً خطی

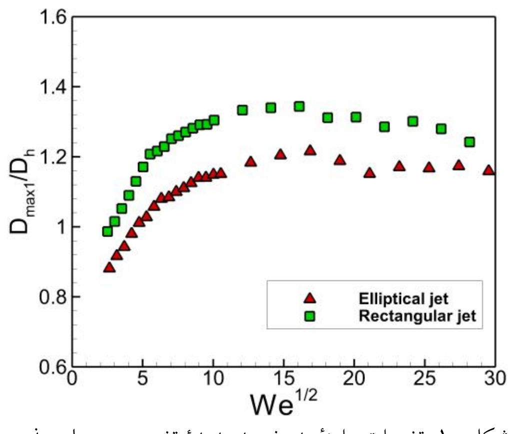
دارد. این رفتار خطی در شکل (۹) برای هر دو جت بیضوی و مستطیلی مشاهده می‌شود. همچنین، نتایج موجود با کار کاسیاپ و همکاران [15] برای جت بیضوی با هم مقایسه شده‌است که تطابق عالی بین آنها وجود دارد. یکسان‌بودن طول موج تغییر محور در اعداد وبر پایین برای هر دو جت مستطیلی و بیضوی نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین این پدیده تا حد زیادی از هندسهٔ جت مستقل است. البته باید توجه داشت که در این بررسی تنها یک جت بیضوی با یک جت مستطیلی مقایسه شده‌است و ممکن است برای هندسه‌های با ضرایب منظری بزرگ‌تر این وضعیت تغییر کند. با افزایش عدد وبر، مشاهده می‌شود که طول موج تغییر محور جت مستطیلی بزرگ‌تر می‌شود و شیب نمودار آن بیشتر می‌گردد. به‌کمک نتایج به‌دست‌آمده، رابطهٔ نیمه‌تجربی (۲) برای محاسبهٔ طول موج تغییر محور تخمین زده شده‌است. طول موج به‌دست‌آمده در این رابطه برحسب میلی‌متر می‌باشد. باید توجه داشت که به‌دلیل رشد و گسترش ناپایداری‌های روی ستون جت در سرعت‌های بالا، اندازه‌گیری طول موج تغییر محور دیگر ممکن نیست و به‌همین‌دلیل، می‌توان گفت که این پدیده در بازهٔ خاصی از اعداد وبر قابل رؤیت است.

$$\lambda_{as} = 3.13We^{\frac{1}{2}} - 3.83 \qquad (۲)$$



شکل ۹ تغییرات طول موج تغییر محور با مجذور عدد وبر

دامنهٔ موج تغییر محور برای جت‌های بیضوی و مستطیلی در شرایط مختلف جت به‌دست‌آمده و با قطر هیدرولیک هر جت بدون بعد شده‌است. تغییرات دامنهٔ موج بدون بعد با مجذور عدد وبر در شکل (۱۰) آمده‌است. مطابق شکل دامنهٔ موج در سرعت‌های پایین برای هر دو جت به‌صورت نسبتاً خطی افزایش پیدا می‌کند تا این‌که سرانجام به یک نقطهٔ بیشینه می‌رسد. نقطهٔ بیشینه برای هر دو جت تقریباً در عدد وبر یکسانی اتفاق می‌افتد. پس از این نقطهٔ بیشینه، دامنهٔ موج با شیب کم روند کاهشی پیدا می‌کند که این روند برای هر دو جت تقریباً یکسان است. بزرگ‌تر بودن دامنهٔ موج جت مستطیلی نشان می‌دهد که این جت قابلیت نفوذ بیشتری نسبت به جت بیضوی دارد. باید اشاره شود که با افزایش سرعت جت و شکل‌گیری ناآرامی‌های مختلف برروی ستون جت، هندسهٔ آن به‌قدری دچار تغییر شکل می‌شود که امکان درنظر گرفتن معیار مناسبی برای اندازه‌گیری دامنهٔ موج تغییر محور وجود ندارد. به‌همین‌دلیل است که اندازه‌گیری دامنهٔ موج همانند طول موج، به بازهٔ خاصی محدود می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات دامنهٔ بدون بعد پدیدهٔ تغییر محور با مجذور عدد وبر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مشخصه‌های تزریق جت‌های آب بیضوی، مستطیلی و دایروی به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. به‌کمک روش سایه‌نگاری و با بهره‌گیری از یک دوربین سرعت بالا، تصاویر ستون جت در شرایط مختلف ثبت شد و به‌کمک آن ناپایداری ستون مایع در اعداد وبر مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. پارامترهای اصلی جت‌های مستطیلی و بیضوی مورد مقایسه قرار گرفت و از جت دایروی به‌عنوان هندسهٔ مرجع استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در اعداد وبر بالا، طول شکست میانگین جت‌های بیضوی و مستطیلی به‌مراتب از جت دایروی بزرگ‌تر است. درحالی‌که برای جت‌های مستطیلی و بیضوی طول شکست تقریباً برابر است. همچنین مشاهده شد که جت‌های بیضوی و مستطیلی زودتر وارد رژیم جریان باد القایی اول و دوم می‌شوند. از طرفی نشان داده شد که طول موج تغییر محور در سرعت‌های پایین به هندسهٔ جت وابسته نیست، اما در سرعت‌های بالاتر آهنگ تغییرات آن با مجذور عدد وبر برای جت مستطیلی بیشتر از جت بیضوی است. برپایهٔ این اندازه‌گیری‌ها، یک رابطهٔ نیمه‌تجربی برای تخمین طول موج تغییر محور جت‌های بیضوی و مستطیلی پیشنهاد شد.

مراجع

1. Savart, F., "Mémoire Sur la Constitution des Veines Liquides Lancées par des Orifices Circulaires en Mince Paroi", *Ann. Chim. Phys*, Vol. 53, No. 337, (1833).
2. Plateau, J., "Statique Experimentale et. Theorique des Liquids Soumie aux Seules Forces", *Cauthier Villars, Paris*, Vol. 1 & 2, pp. 450-495, (1873).
3. Rayleigh, L., "On the Instability of Jets", *Proc. R. Soc. London*, Vol. 10, pp. 4-13, (1878).
4. Rayleigh, L., "On the Capillary Pheomena of Jets", *Proc. R. Soc. London*, Vol. 29, pp. 71-97, (1879).
5. Weber, C., "Zum Zerfall Eines Flüssigkeitsstrahles", *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/*Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 11, No. 2, pp. 136-154, (1931).
6. Taylor, G.I., "Generation of Ripples by Wind Blowing over Viscous Fluids", *In The Scientific Papers of G.I. Taylor, ed. GK Batchelor*, Cambridge Univ., Vol. 3, pp. 244-254, (1962).
7. Bogy, D.B., "Drop Formation in a Circular Liquid Jet", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 1, pp. 207-228, (1979).
8. Reitz, R.D., "Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 3, pp. 233-249, (1986).
9. Lin, S.P. and Reitz, R.D., "Drop and Spray Formation from a Liquid Jet", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, No. 1, pp. 85-105, (1998).
10. Birouk, M. and Lekic, N. "Liquid Jet Breakup in Quiescent Atmosphere: A Review", *Atomization and Sprays*, Vol. 19, No. 6, pp. 501-528, (2009).
11. Gutmark, E.J. and Grinstein, F.F., "Flow Control with Noncircular Jets", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 31, No. 1, pp. 239-272, (1999).
12. Wang, F. and Fang, T., "Liquid Jet Breakup for Non-circular Orifices under Low Pressures", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 72, pp. 248-262, (2015).
13. Magnus, G., "Hydraulische Untersuchungen", *Ann. Phys.*, Vol. 171, pp. 1-59, (1855).

14. Kasyap, T.V., Sivakumar, D. and Raghunandan, B.N., "Breakup of Liquid Jets Emanating from Elliptical Orifices at Low Flow Conditions", *Atomization and Sprays*, Vol. 18, No. 7, pp. 1-24, (2008).
15. Kasyap, T.V., Sivakumar, D. and Raghunandan, B.N. "Flow and Breakup Characteristics of Elliptical Liquid Jets", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 1, pp. 8-19, (2009).
16. Amini, G. and Dolatabadi, A., "Axis-switching and Breakup of Low-speed Elliptic Liquid Jets", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 42, pp. 96-103, (2012).
17. Sharma, P. and Fang, T., "Breakup of Liquid Jets from Non-circular Orifices", *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 2, pp. 1-17, (2014).
18. Konkachbaev, A.I., Morley, N.B., Gulec, K. and Sketchley, T., "Stability and Contraction of a Rectangular Liquid Metal Jet in a Vacuum Environment", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 51, pp. 1109-1114, (2000).
19. Negeed, E.S.R., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., "Experimental and Analytical Investigation of Liquid Sheet Breakup Characteristics", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, pp. 95-106, (2011).